

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання практичної та самостійної роботи

з навчальної дисципліни

ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА СКЛОМАТЕРІАЛІВ

*(для студентів 1 курсу денної форми навчання
другого (магістерського) рівня вищої освіти
за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2020

Методичні рекомендації до виконання практичної та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Теорія виробництва скломатеріалів» (для студентів 1 курсу денної та заочної форм навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: Г. К. Воронов, О. В. Саввова, Ю. О. Смирнова, О. І. Фесенко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 47 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. Г. К. Воронов,
д-р техн. наук, доц. О. В. Саввова,
канд. техн. наук, ст. викл. Ю. О. Смирнова,
канд. техн. наук, ас. О. І. Фесенко

Рецензент

Т. Д. Панайотова, кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою хімії та інтегрованих технологій, протокол № 1 від 28.08.2019.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Розрахунки шихти скломатеріалів	5
1.1 Розрахунок шихти за хімічним складом сировини	5
1.2 Деякі спеціальні розрахунки шихти.....	20
2 Визначення технологічних параметрів теплової обробки скловиробів	27
2.1 Розрахунок технологічних параметрів формування скловиробів	27
2.2 Розрахунок температури та режиму відпалу скла	35
Список рекомендованої літератури.....	43
Додаток А. Характеристика матеріалів, що використовуються при виготовленні стекол, глазурних та емалевих фрит	44

ВСТУП

Методичні рекомендації розроблені в межах учбового курсу «Теорія виробництва скломатеріалів» для закріплення теоретичних знань щодо застосовування сучасних сировинних матеріалів в технологіях тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів.

У рекомендаціях викладено принципи вибору складу скла і сировинних матеріалів для отримання скловиробів різного призначення. Видання включає основні методи розрахунку складу скляної шихти по заданому складу скла для варіння скла різного призначення, а також складу скла по заданому складу шихти. Практичні навички розрахунку шихти є одними з основних в роботі кваліфікованого спеціаліста. Дані рекомендації також включають ряд методик розрахунку технологічних і фізико-хімічних властивостей стекол. Особливу увагу приділено методам розрахунку параметрів формування та відпалу скляних виробів..

Наявність надійних розрахункових методів дозволяє оперативно, без проведення дорогих експериментальних робіт визначити властивості стекол при розробці нових складів і коригування промислових. Розрахункові методи використовуються як в науково-дослідній роботі, так і в практичній роботі фахівця-технолога.

Рекомендації розраховані на студентів, які проходять підготовку за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія.

1 РОЗРАХУНКИ ШИХТИ СКЛОМАТЕРІАЛІВ

1.1 Розрахунок шихти за хімічним складом сировини

Розрахунки для визначення кількості кожної сировини, необхідної для отримання заданої кількості скла, емалевої або глазурної фрити, проводять на 100 мас. %. скла чи фрити, що полегшує усі наступні техніко-економічні розрахунки виробництв. У промисловій практиці склад стекол, емалей чи полив зазвичай виражають у мас. ч., а розрахунки промислових шихт ведуть з точністю до другого десяткового знака.

При розрахунках приймають, що сировина, яка входить до складу шихти, у процесі варіння скла розкладається, причому в скло переходять тільки оксиди, а волога та газів втрачаються в процесі варіння. Незначна частина вологи та газів поглинається склом, але ця кількість не є сталою і не береться до уваги.

Загальні втрати шихти від початку завантаження в піч до моменту готовності скломаси складаються із втрат на винесення і вигорання та становлять в середньому 20 %. Технологічний термін «винесення» пояснюється таким: під дією теплового потоку, направлено з отвору розігрітої до температури варіння скломаси печі, виносяться дрібнодисперсні компоненти скляної шихти. Так зване «вигорання» компонентів шихти відбувається на всіх технологічних стадіях процесу варіння скломаси.

Приклади розрахунків

Приклад 1. Хімічний склад скла, мас. %: SiO_2 – 71; Al_2O_3 – 1,5; CaO – 8,5; MgO – 3,5; Na_2O – 15,5. Кількість скла, що його необхідно отримати, – 3 т (3000 кг). Хімічний склад сировинних матеріалів наведений у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сировинних матеріалів

Матеріал	Вміст компонентів, мас. %						
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	В.п.п.
Пісок	98,02	0,1	1,09	–	0,11	–	0,48
Крейда	1,78	0,27	1,0	54,17	0,16	–	42,62
Сода	–	–	–	–	–	58,5	41,5
Доломіт	3,2	0,53	2,57	27,06	19,62	–	47,02
Технічний глинозем	0,4	0,05	97,9	0,35	–	–	1,3

Розрахунки починають з того компонента скла, який вводиться найменшою кількістю сировинних матеріалів. Як видно з таблиці 1.1, SiO₂ вводиться чотирма сировинними матеріалами, CaO і MgO – трьома, Na₂O – одним. Отже, розрахунок треба починати з Na₂O.

Оксид натрію вводиться у склад скла содою. Її кількість у шихті визначають з пропорції:

100 мас. ч. соди містить – 58,5 мас. ч. Na₂O;

X мас. ч. соди треба взяти для введення – 15,5 мас. ч. Na₂O.

Отже: $X = 26,5$ мас. ч.

Враховуючи, що, як правило, 3 % соди при температурі варіння скла виноситься, потрібно ввести в шихту соди на 3 % більше, а саме:

$$26,5 \cdot 1,03 = 27,3 \text{ мас. ч. соди.}$$

Оскільки сода кальцинована не містить у своєму хімічному складі ніяких інших компонентів, то ця сировина нічого більше не внесе у склад скла.

MgO вводиться у скло доломітом. Визначаємо кількість доломіту в шихті, необхідну для введення у скло 3,5 мас. ч. MgO. Кількість доломіту в шихті розрахуємо, виходячи з пропорції:

100 мас. ч. доломіту внесе у скло – 19,62 мас. ч. MgO

X мас. ч. доломіту потрібно взяти для введення у скло – 3,5 мас. ч. MgO.

Отже, $X = 17,8$ мас. ч. доломіту.

Оскільки доломіт є природною сировиною та містить у своєму складі й інші оксиди, то слід визначити кількість цих домішок, які увійдуть у склад скла з 17,8 мас. ч. доломіту.

Доломіт внесе до складу скла:

$$\text{SiO}_2 \quad 17,8 \cdot 3,2 / 100 = 0,57 \text{ мас. ч.};$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \quad 17,8 \cdot 0,53 / 100 = 0,09 \text{ мас. ч.};$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \quad 17,8 \cdot 2,57 / 100 = 0,5 \text{ мас. ч.};$$

$$\text{CaO} \quad 17,8 \cdot 27,06 / 100 = 4,8 \text{ мас. ч.}$$

Оксид кальцію вводиться у скло крейдою. Визначаємо кількість крейди у шихті, необхідну для введення у скло оксиду кальцію. Кількість крейди визначається за аналогією з розрахунком соди і доломіту. Але при розрахунку треба врахувати ту кількість CaO, яка вже увійшла в скло з доломітом. Тоді:

$$100 \text{ мас. ч. крейди внесе у склад скла} - 54,17 \text{ мас. ч. CaO}$$

$$X \text{ мас. ч. крейди потрібно взяти для введення у скло } 8,5 - 4,8 \text{ мас. ч. CaO.}$$

Звідси $X = 6,8$ мас. ч. крейди.

Далі слід розрахувати кількість домішок, які увійдуть у склад скла з 6,8 мас. ч. крейди.

Крейда внесе у склад скла:

$$\text{SiO}_2 \quad 6,8 \cdot 1,78 / 100 = 0,12 \text{ мас. ч.};$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \quad 6,8 \cdot 0,27 / 100 = 0,02 \text{ мас. ч.};$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \quad 6,8 \cdot 1,0 / 100 = 0,07 \text{ мас. ч.};$$

$$\text{MgO} \quad 6,8 \cdot 0,16 / 100 = 0,01 \text{ мас. ч.}$$

SiO₂ вводиться у склад скла піском. Деяка кількість SiO₂ уже введена у скло доломітом і крейдою, отже, залишається ввести SiO₂ у кількості:

$$71 - 0,69 = 70,31 \text{ мас. ч.}$$

Визначаємо кількість піску, необхідну для введення 70,31 мас. ч. SiO₂, складаючи пропорцію:

$$100 \text{ мас. ч. піску містить} - 98,02 \text{ мас. ч. SiO}_2;$$

$$X \text{ мас. ч. піску необхідно взяти для введення у скло} - 70,31 \text{ мас. ч. SiO}_2$$

Звідси $X = 71,73$ мас. ч. піску.

З такою кількістю піску у склад скла ввійдуть домішки:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \quad 71,73 \cdot 0,1 / 100 = 0,07 \text{ мас. ч.};$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \quad 71,73 \cdot 1,09 / 100 = 0,78 \text{ мас. ч.};$$

$$\text{MgO} \quad 71,73 \cdot 0,11 / 100 = 0,08 \text{ мас. ч.}$$

Al_2O_3 вводиться у скло технічним глиноземом. Розрахуємо кількість технічного глинозему в шихті аналогічно тому, як це робилося для інших матеріалів: $X = 0,15 \cdot 100 : 97,9 = 0,153$ мас. ч. Кількість домішок, які увійдуть у склад скла з 0,153 мас. ч. технічного глинозему, можна не враховувати, оскільки це дуже малі величини.

Отже, склад шихти становить:

соди – 27,30 мас. ч.;

доломіту – 17,80 мас. ч.;

крейди – 6,80 мас. ч.;

піску – 71,73 мас. ч.;

технічного глинозему – 0,153 мас. ч.;

разом шихти: 123,8 мас. ч.

Фактичний склад скла, який може бути отримано з цієї шихти, не збігатиметься повністю із заданим, оскільки сировинні матеріали, які були використані, вносять у скло додатково такі оксиди, яких немає в заданому складі скла. Це певною мірою впливає на загальну масу скла і робить її більшою за 100 мас. ч. Перед тим як визначити кількість шихти для отримання 100 мас. ч. скла ($C_{\text{ш}}$), необхідно розрахувати його теоретичний склад. Цей розрахунок полягає у визначенні сумарної кількості оксидів, які вносяться у скло всіма сировинними матеріалами, вміст яких у складі шихти було визначено вище. Результати цих розрахунків заносять до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Теоретичний хімічний склад скла

Матеріал	Шихтовий склад, мас. ч.	Вміст оксидів, що вносяться у скло сировиною, мас. %						Σ*
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	
Сода	27,3	–	–	–	–	–	15,5	15,5
Доломіт	17,8	0,57	0,09	0,5	4,8	3,5	–	9,46
Крейда	6,8	0,12	0,02	0,07	3,7	0,01	–	3,92
Пісок	71,73	70,31	0,07	0,78	–	0,08	–	71,24
Глинозем	0,153	–	–	0,15	–	–	–	0,15
Разом	123,8	71	0,18	1,5	8,5	3,59	15,5	100,27
		Хімічний склад скла, мас. %						
На 100 кг скла	123,5	70,8	0,18	1,5	8,48	3,58	15,46	100
Σ* – сумарна кількість оксидів, яка вноситься кожним компонентом шихти								

З таблиці 1.2 видно, що загальна маса скла, яку розраховано на основі фактичного складу скла, становить 100,27 мас. ч. Для отримання такої кількості скла, як це було визначено вище, необхідно взяти 123,8 мас. ч. шихти. Нескладно перерахувати, скільки шихти потрібно взяти для отримання 100 мас. ч. скла – у нашому випадку 123,5 мас. ч. шихти. До того ж в останньому рядку таблиці наводять теоретичний склад скла, приведений до 100 мас. ч., який і слід порівнювати із заданим хімічним складом.

Отже, на підставі проведених розрахунків встановлено, що для отримання 100 мас. ч. скла заданого хімічного складу необхідна кількість шихти (C_ш) становитиме 123,5 мас. ч. Кількість кожної сировини у 123,5 мас. ч. шихти становить:

$$\text{соди} - \frac{123,5 \cdot 27,3}{123,8} = 27,23 \text{ кг};$$

$$\text{доломіту} - \frac{123,5 \cdot 17,8}{123,8} = 17,76 \text{ кг};$$

$$\text{крейди} - \frac{123,5 \cdot 6,8}{123,8} = 6,78 \text{ кг};$$

$$\text{піску} - \frac{123,5 \cdot 71,73}{123,8} = 71,56 \text{ кг};$$

$$\text{технічного глинозему} - \frac{123,5 \cdot 0,153}{123,8} = 0,153 \text{ кг}.$$

Далі необхідно розрахувати кількість шихти для виготовлення 3 т скла. Це досить легко зробити, враховуючи дані про кількість шихти для 100 кг скла (табл. 1.2) та складаючи відповідні пропорції:

для 100 кг скла необхідно мати – 123,5 кг шихти

для 3000 кг скла необхідно мати – X кг шихти

Звідси $X = 3705$ кг шихти.

Кількість кожного з сировинних матеріалів у 3705 кг шихти становитиме:

$$\text{соди} - \frac{3705 \cdot 27,23}{123,5} = 816,9 \text{ кг};$$

$$\text{доломіта} - \frac{3705 \cdot 17,76}{123,5} = 532,8 \text{ кг};$$

$$\text{крейди} - \frac{3705 \cdot 6,78}{123,5} = 203,4 \text{ кг};$$

$$\text{піску} - \frac{3705 \cdot 71,56}{123,5} = 2146,8 \text{ кг};$$

$$\text{технічного глинозему} - \frac{3705 \cdot 0,153}{123,5} = 4,59 \text{ кг}.$$

Саме з цієї кількості сировини і буде складатися шихта для виготовлення 3 т скла заданого хімічного складу.

Наприкінці розрахунків потрібно навести дані про так званий вихід скла (C_c) із шихти, що означає ту кількість скла, яку отримують з 100 мас. ч. шихти:

123,5 мас. ч. шихти дають – 100 мас. ч. скла;

100 мас. ч. шихти дадуть – X мас. ч. скла.

Звідси $X = 81$ мас. ч., тобто із 100 мас. ч. шихти можна отримати 81 мас. ч. скла. Вихід скла за його процентним відношенням до маси шихти визначається з пропорції:

100 мас. ч. шихти становлять 100 %;

81 мас. ч. скла – X %.

Звідси вихід скла становить $X = 81$ % від маси шихти. Кількість відсотків, яких бракує до 100 %, складають втрати летких складових сировини і шихти (випари води, CO_2 , SO_3 , F^- тощо), які виносяться під час варіння скломаси. Ці втрати прийнято називати втратами шихти на вигорання та винесення. У даному випадку ці втрати дорівнюють:

$$100 - 81 = 19 \%$$

Дані про вихід скла і втрати шихти на вигорання та винесення є обов'язковими при розрахунках скляної, емалевої чи полив'яної шихт. Ними завершується розрахунок шихти.

Приклад 2. Розрахунок шихтового складу емалевої фрити, яка містить фтор.

Хімічний склад емалевої фрити DM-1 для розрахунку за першим та другим методом наведено в таблиці 1.3.

Хімічний склад сировинних матеріалів, що використовуються при виготовленні емалей, наведено в таблиці додатка А.

Розрахунок складу шихти за першим методом (якщо фтор виноситься понад 100 %).

Таблиця 1.3 – Хімічний склад емалевої фрити ЕСБ

Оксиди	Вміст, мас. %	Оксиди	Вміст, мас. %
Для розрахунку за 1-м методом		Для розрахунку за 2-м методом	
SiO ₂	42,4	SiO ₂	42,0
B ₂ O ₃	8,7	B ₂ O ₃	8,5
Al ₂ O ₃	4,8	Al ₂ O ₃	4,7
TiO ₂	4,1	TiO ₂	4,0
Na ₂ O	9,2	Na ₂ O	9,0
K ₂ O	6,9	K ₂ O	6,8
Li ₂ O	2,0	Li ₂ O	2,0
CaO	5,2	CaO	2,0
BaO	5,6	BaO	5,5
Fe ₂ O ₃	2,5	Fe ₂ O ₃	2,5
MnO ₂	1,5	MnO ₂	1,5
CoO	0,5	CoO	0,5
NiO	0,5	NiO	0,5
ZrO ₂	6,1	ZrO ₂	6,0
CaF ₂	–	CaF ₂	4,5
Сума	100,0 + 2,2 % F ⁻	Сума	100,0

Спочатку обираємо сировинні матеріали з якими буде здійснюватись введення оксидів до складу емалі:

SiO₂ – вводимо піском Новоселівського родовища;

B₂O₃ – бурюю кристалічною Na₂B₄O₇·10H₂O;

Al₂O₃ – глиноземом;

TiO₂ – рутиловим концентратом;

Na₂O – кальцинованою содою Na₂CO₃;

K₂O – поташем K₂CO₃;

Li₂O – вуглекислим літієм Li₂CO₃;

CaO – крейдою CaCO₃;

BaO – карбонатом барію BaCO₃;

MnO₂, Fe₂O₃, CoO, NiO – чистими оксидами;

CaF₂ – плавиковим шпатом;

ZrO₂ – цирконом ZrSiO₄.

Для введення 2,2 % F⁻ необхідно взяти плавикового шпату:

$$2,2 \cdot 2,05 = 4,51 \text{ мас. ч. CaF}_2,$$

де 2,05 – шихтний множник.

Із введенням 4,51 мас. ч. плавикового шпату ввели також оксид кальцію в кількості:

$$4,51 : 1,39 = 3,24 \text{ мас. ч.}$$

Разом із крейдою залишилось ввести CaO:

$$5,2 - 3,24 = 1,96 \text{ мас. ч. CaO.}$$

Визначаємо кількість крейди, необхідної для введення 1,96 мас. ч. CaO:

$$1,96 \cdot 1,78 = 3,48 \text{ мас. ч. крейди.}$$

Якщо в таблиці додатка А відсутні шихтні множники деяких сировинних матеріалів, розрахунок шихти проводиться за молекулярною масою компонентів. У першу чергу необхідно розрахувати комплексні сировинні матеріали, якими вводять два та більше оксиди. До таких компонентів, крім розрахованого в даному прикладі CaF₂, належать: циркон ZrSiO₄, бура кристалічна Na₂B₄O₇·10H₂O.

Почнемо з циркону ZrSiO₄, молекулярна маса якого дорівнює 183,22.

У процесі варіння емалі циркон розкладається на ZrO₂ та SiO₂ за реакцією



183,22 мас. ч. ZrSiO₄ вносять 123,22 мас. ч. ZrO₂ та 60 мас. ч. SiO₂.

Складемо пропорцію для визначення кількості циркону, яка необхідна для введення 6,1 мас. ч. ZrO₂:

$$183,22 \text{ мас. ч. ZrSiO}_4 - 123,22 \text{ мас. ч. ZrO}_2$$

$$X \text{ мас. ч. ZrSiO}_4 - 6,1 \text{ мас. ч. ZrO}_2$$

$$\text{Звідси } X = 183,22 \cdot 6,1 / 123,22 = 9,07 \text{ мас. ч. ZrSiO}_4.$$

З ZrSiO_4 вводимо також SiO_2 , кількість якого знаходимо з пропорції:

$$183,22 \text{ мас. ч. } \text{ZrSiO}_4 - 60 \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2;$$

$$9,07 \text{ мас. ч. } \text{ZrSiO}_4 - Y \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2.$$

$$\text{Звідси } Y = 9,07 \cdot 60 / 183,22 = 2,97 \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2.$$

З кварцовим піском залишилось ввести SiO_2 в кількості

$$42,4 - 2,97 = 39,43 \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2.$$

Кварцовий пісок Новоселівського родовища містить 99,00 % SiO_2 ; 0,10 % Al_2O_3 ; 0,02 % Fe_2O_3 ; 0,01 % TiO_2 та 0,30 % в. п. п. (див. додаток А). Розраховуємо кількість кварцового піску, яку необхідно взяти для введення 39,43 мас. ч. SiO_2 :

$$100 \text{ мас. ч. піску} - 99,0 \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2;$$

$$X \text{ мас. ч. піску} - 39,43 \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2.$$

$$\text{Звідси } X = 100 \cdot 39,43 / 99,0 = 39,83 \text{ мас. ч. кварцового піску.}$$

Визначаємо кількість Al_2O_3 , яка введена до складу шихти з кварцовим піском:

$$39,83 \cdot 0,001 = 0,03983 \approx 0,04 \text{ мас. ч. } \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ ввели з кварцовим піском.}$$

З глиноземом залишилось ввести таку кількість Al_2O_3 :

$$4,8 - 0,03983 = 4,76 \text{ мас. ч. } \text{Al}_2\text{O}_3$$

Цю кількість Al_2O_3 вводимо глиноземом, який представлений майже чистим Al_2O_3 .

З кварцовим піском до шихти також потрапив Fe_2O_3 в кількості:

$$39,83 \cdot 0,0002 = 0,007966 \approx 0,01 \text{ мас. ч. } \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Залишилось ввести Fe_2O_3 , який вводиться чистим оксидом:

$$2,5 - 0,007966 = 2,49 \text{ мас. ч. } \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Далі визначаємо кількість кристалічної бури ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), необхідної для введення B_2O_3 . Для розрахунку скористаймося шихтними множниками: 2,74 для B_2O_3 та 6,15 для Na_2O (див. таблицю Д 1.6 додатка). Таким чином для введення 8,7 мас. ч. B_2O_3 необхідно взяти:

$$8,7 \cdot 2,74 = 23,84 \text{ мас. ч. кристалічної бури } (\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}).$$

Тепер розрахуємо Na_2O , введеного з вищевизначеною кількістю бури:

$$23,84 : 6,15 = 3,87 \text{ мас. ч. } \text{Na}_2\text{O}.$$

Таким чином з кальцинованою содою залишилось ввести Na_2O у кількості:

$$9,2 - 3,87 = 5,33 \text{ мас. ч. } \text{Na}_2\text{O}.$$

Для розрахунку кількості кальцинованої соди використовуємо шихтний множник для Na_2O , що вводиться кальцинованою содою (див. таблицю додаток 1), який дорівнює 1,71.

$$5,33 \cdot 1,71 = 9,11 \text{ мас. ч. } \text{Na}_2\text{CO}_3.$$

Оскільки K_2O в даному прикладі вводиться поташем (K_2CO_3), у таблиці 1.6 додатка А знаходимо шихтний множник для K_2O , що вводиться поташем. Він дорівнює 1,47. Далі визначаємо кількість поташу, необхідного для введення 6,9 мас. ч. K_2O

$$6,9 \cdot 1,47 = 10,14 \text{ мас. ч. } \text{K}_2\text{CO}_3.$$

Шихтний множник для Li_2O , що вводиться вуглекислим літієм (Li_2CO_3), знаходимо в тій самій таблиці. Він дорівнює 2,47. Визначаємо кількість вуглекислого літію, необхідного для введення 2 мас. ч. Li_2O :

$$2,0 \cdot 2,47 = 4,94 \text{ мас. ч. } \text{Li}_2\text{CO}_3.$$

BaO вводимо барієм вуглекислим (BaCO_3). У цьому випадку його шихтний множник становить 1,29. Кількість BaCO_3 , необхідного для введення до шихти 5,6 мас. ч. BaO , знаходимо таким чином:

$$5,6 \cdot 1,29 = 7,22 \text{ мас. ч. } \text{BaCO}_3.$$

TiO_2 вводиться рутиловим концентратом, який за хімічним складом представлений оксидом титану, і тому його кількість становитиме 4,1 мас. ч.

Аналогічно кількість оксидів, які вводяться до шихти чистими оксидами, має бути: MnO_2 – 1,5 мас. ч.; CoO – 0,5 мас. ч.; NiO – 0,5 мас. ч.

Таким чином, отримуємо склад шихти для виготовлення склоемалі: плави́ковий шпат – 4,51; крейда – 3,48; циркон – 9,07; кварцовий пісок – 39,83; глинозем – 4,76; бура кристалічна – 23,84; сода кальцинована – 9,11; поташ – 10,14; літій вуглекислий – 4,94; барій вуглекислий – 7,22; Fe_2O_3 – 2,49; MnO_2 – 1,5; CoO – 0,5; NiO – 0,5.

Приклад 3. Розрахунок складу шихти (якщо фтор входить до 100 %)

Для розрахунку за другим способом використовуємо хімічний склад емалевої фрити, наведений у таблиці 1.3, в якому фтор введений плави́ковим шпатом CaF_2 , вноситься до 100 % складу.

ZrO_2 вводимо ZrSiO_4 цирконом, молекулярна маса якого 183,22. З 183,22 мас. ч. ZrSiO_4 до шихти надходить 123,22 мас. ч. ZrO_2 та 60 мас. ч. SiO_2 . Визначаємо кількість циркону, необхідну для введення 6 мас. ч. ZrO_2 :

$$183,22 \text{ мас. ч. } \text{ZrSiO}_4 - 123,22 \text{ мас. ч. } \text{ZrO}_2;$$

$$X \text{ мас. ч. } \text{ZrSiO}_4 - 6 \text{ мас. ч. } \text{ZrO}_2.$$

$$\text{Звідси } X = 183,22 \cdot 6 : 123,22 = 8,92 \text{ мас. ч. циркону } \text{ZrSiO}_4.$$

З цирконом вводимо також SiO_2 в кількості, яку визначаємо за пропорцією:

$$183,22 \text{ мас. ч. } \text{ZrSiO}_4 - 60 \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2;$$

$$8,92 \text{ мас. ч. } \text{ZrSiO}_4 - Y \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2.$$

$$\text{Звідси } Y = 8,92 \cdot 60 : 183,22 = 2,92 \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2.$$

Визначаємо кількість SiO_2 , яку треба ввести кварцовим піском:

$$42,0 - 2,92 = 39,08 \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2.$$

Кварцовий пісок Новоселівського родовища містить (мас. %) $\text{SiO}_2 - 99,00$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,10$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,02$; $\text{TiO}_2 - 0,01$ та в. п. п. $- 0,30$ %. Для введення $39,08$ мас. ч. SiO_2 необхідно взяти кварцового піску:

$$100 \text{ мас. ч. піску} - 99,0 \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2$$

$$X \text{ мас. ч. піску} - 39,08 \text{ мас. ч. } \text{SiO}_2$$

$$\text{Звідси } X = 100 \cdot 39,08 : 99,0 = 39,47 \text{ мас. ч. кварцового піску.}$$

З кварцовим піском, крім SiO_2 , ввели Al_2O_3 у кількості:

$$39,47 \cdot 0,001 = 0,03947 \approx 0,4 \text{ мас. ч. } \text{Al}_2\text{O}_3.$$

З глиноземом залишилось ввести Al_2O_3 :

$$4,7 - 0,03947 = 4,66 \text{ мас. ч. } \text{Al}_2\text{O}_3.$$

З кварцовим піском, крім SiO_2 , також ввели Fe_2O_3 у кількості:

$$39,47 \cdot 0,0002 = 0,007894 \text{ мас. ч. } \text{Fe}_2\text{O}_3.$$

Чистим оксидом залишилось ввести Fe_2O_3 у кількості:

$$2,5 - 0,007894 = 2,49 \text{ мас. ч. } \text{Fe}_2\text{O}_3.$$

Кількість кристалічної бури, кальцинованої соди, поташу, вуглекислого літію та вуглекислого барію визначаємо з використанням шихтних множників (див. таблицю додатка А). Таким чином, треба взяти:

$$8,5 \text{ мас. ч.} \cdot 2,74 = 23,29 \text{ мас. ч. кристалічної бури.}$$

З бурою до шихти потрапляє також Na_2O в кількості:

$$23,29 \text{ мас. ч.} : 6,15 = 3,78 \text{ мас. ч. Na}_2\text{O}.$$

Із содою залишилось ввести Na_2O :

$$9,0 - 3,78 = 5,22 \text{ мас. ч. Na}_2\text{O}.$$

Кількість кальцинованої соди, необхідної для введення 5,22 мас. ч. Na_2O , визначається з урахуванням відповідного шихтного множника, який дорівнює 1,71:

$$5,22 \cdot 1,71 = 8,92 \text{ мас. ч. Na}_2\text{CO}_3.$$

K_2O вводимо поташем K_2CO_3 . Шихтний множник для K_2O , що вводиться поташем, – 1,47. Звідси необхідна кількість поташу становитиме:

$$6,8 \cdot 1,47 = 9,996 \text{ мас. ч. поташу.}$$

Li_2O вводимо літієм вуглекислим Li_2CO_3 . Шихтний множник для Li_2O , що вводиться Li_2CO_3 , – 2,47. Тому необхідна кількість вуглекислого літію становить:

$$2,0 \cdot 2,47 = 4,94 \text{ мас. ч. Li}_2\text{CO}_3.$$

CaO вводимо крейдою CaCO_3 . Шихтний множник для CaO , що вводиться крейдою, – 1,78. Визначаємо необхідну кількість крейди:

$$2,0 \cdot 1,78 = 3,56 \text{ мас. ч. крейди.}$$

BaO вводимо барієм вуглекислим BaCO_3 . Шихтний множник для BaO , що вводиться карбонатом барію, – 1,29. Кількість вуглекислого барію визначається як:

$$5,5 \cdot 1,29 = 7,095 \text{ мас. ч. BaCO}_3.$$

Al_2O_3 вводимо глиноземом і оскільки він представлений практично чистим Al_2O_3 , його кількість має бути 4,7 мас. ч.

TiO_2 вводиться рутиловим концентратом (також чистим оксидом титану) – 4,0 мас. ч.

Решта компонентів вводиться хімічно чистими сполуками, кількість яких відповідає вмісту оксидів у складі фрити: Fe_2O_3 – 2,5 мас. ч.; MnO_2 – 1,5 мас. ч.; CoO – 0,5 мас. ч.; NiO – 0,5 мас. ч.; CaF_2 – 4,5 мас. ч.

Після розрахунку всіх компонентів складаємо рецептуру приготування шихти (таблиця 1.4).

Таблиця 1.4 – Шихтовий склад емалевої фрити ЕСБ

Сировинні матеріали	Вміст компонента шихти, мас. %	
	перший метод	другий метод
Пісок кварцовий	39,43	39,08
Бура кристалічна $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	23,84	23,29
Глинозем	4,8	4,7
Рутиловий концентрат TiO_2	4,1	4,0
Сода кальцинована Na_2CO_3	9,11	8,92
Поташ K_2CO_3	10,14	9,995
Літій вуглекислий Li_2CO_3	4,94	4,94
Крейда CaCO_3	3,5	3,56
Барій вуглекислий BaCO_3	7,22	7,095
Fe_2O_3	2,5	2,5
MnO_2	1,5	1,5
CoO	0,5	0,5
NiO	0,5	0,5
Плавииковий шпат CaF_2	4,51	4,5
Циркон ZrSiO_4	9,07	8,92
Всього	125,66	124,0

1.2 Деякі спеціальні розрахунки шихти

Розрахунок складу шихти за допомогою системи рівнянь

Розрахунок складу шихти скла зводиться до визначення необхідної кількості сировинних матеріалів, виходячи з їх хімічного складу, втрат на звітрювання й хімічного складу скла. При цьому складаються та розв'язуються рівняння. Шихта розраховується на 100 мас. ч. скломаси.

Приклад розрахунку

Розрахувати склад шихти віконного скла, мас. %: SiO_2 – 71,0; Al_2O_3 – 1,5; CaO – 8,5; MgO – 3,5; Na_2O – 15,5.

Обираємо сировинні матеріали для введення цих оксидів. Це – пісок, технічний глинозем, крейда, доломіт, сода. Їх приблизний хімічний склад наведено в таблиці 5. У таблиці не враховано вміст Fe_2O_3 в сировинних матеріалах та втрати при прожарюванні.

Позначимо кількість у шихті: піску – x_1 , доломіту – x_2 , глинозему – x_3 , соди – x_4 , крейди – x_5 . Позначимо кількість оксидів у сировині: SiO_2 у піску – S_1 , у крейди – S_2 , у доломіті – S_3 , у технічному глиноземі – S_4 ; Na_2O у соді – N_1 ; CaO у піску – C_1 , у крейди – C_2 , у доломіті C_3 , у технічному глиноземі – C_4 ; MgO у доломіті – M_1 ; Al_2O_3 у піску – A_1 , у доломіті – A_2 , у технічному глиноземі – A_3 .

Таблиця 1.5 – Хімічний склад сировини

Оксиди	Вміст компонентів у складі сировинних матеріалів, мас. %				
	пісок	сода	крейда	доломіт	глинозем
SiO_2	98,95	–	1,47	3,2	0,4
Na_2O	–	57,2	–	–	–
CaO	0,58	–	53,9	27,6	0,35
MgO	–	–	–	19,62	–
Al_2O_3	0,64	–	–	2,57	97,9
* шихтні множники, які враховують вигар матеріалу (дивись додаток А)					

Для визначення кількості сировинних матеріалів у шихті складаємо такі рівняння:

$$71 = S_1 \cdot x_1 + S_2 \cdot x_5 + S_3 \cdot x_2 + S_4 \cdot x_3;$$

$$3,5 = M_1 \cdot x_2;$$

$$1,5 = A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_3;$$

$$15,5 = N_1 \cdot x_4;$$

$$8,5 = C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_5 + C_3 \cdot x_2 + C_4 \cdot x_3.$$

З урахуванням хімічного складу сировини, наведеного в таблиці 1.15, дані рівняння набудуть такого вигляду:

$$71 = 0,9895 x_1 + 0,0147 x_5 + 0,032 x_2 + 0,004 x_3;$$

$$3,5 = 0,1962 x_2;$$

$$1,5 = 0,979 x_1 + 0,0257 x_2 + 0,0064 x_3;$$

$$15,5 = 0,572 x_4;$$

$$8,5 = 0,539 x_5 + 0,2706 x_2 + 0,0058 x_1 + 0,0035 x_3.$$

Після рішення цих рівнянь на ЕОМ отримуємо значення невідомих. Їх сума, як правило, складає 120–130 мас. ч., що відповідає масі шихти для одержання 100 мас. ч. скломаси. Тому втрати на звітрювання при склоутворенні складають 20–30 мас. %.

Таблиця 1.6– Хімічний склад емалевих склофрит

Оксиди	Варіанти завдань										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Вміст компонентів у складі фрити, мас. %										
	DM-1	P2404	EXГ6	ЕЛГ5F	R-1184	DM-45	E-25	DM-40	25Ц	Ф3	ZF-4
SiO ₂	42,0	53,69	41,4	38,5	40,8	44,8	59,3	32,4	52,72	44,5	39,3
B ₂ O ₃	8,5	18,16	18,0	17,5	19,0	27,5	4,5	20,0	5,87	12,0	11,0
Al ₂ O ₃	4,7	—	3,0	2,65	2,0	2,0	2,6	—	3,91	—	5,0
TiO ₂	4,0	1,74	—	1,2	1,0	—	2,0	2,0	1,96	7,0	9,0
Na ₂ O	9,0	13,58	15,0	15,0	10,0	12,5	13,0	20,0	18,0	9,4	12,0
K ₂ O	6,8	0,75	4,9	—	2,0	1,2	2,7	7,5	4,75	6,0	2,0
Li ₂ O	2,0	0,53	3,0	—	3,0	—	3,5	1,0	—	2,5	1,5
CaO	2,0	2,46	3,0	6,75	5,0	4,5	2,5	—	2,35	2,0	2,0
BaO	5,5	0,79	—	3,0	2,0	2,0	—	5,0	—	5,6	—
Fe ₂ O ₃	2,5	2,14	—	—	—	1,5	—	2,0	—	3,5	—
MnO ₂	1,5	3,16	8,0	6,2	0,9	2,5	—	3,0	1,17	1,5	—
CuO	—	—	3,5	3,7	—	1,0	—	1,0	—	—	—
CoO	0,5	0,56	0,2	—	1,0	0,5	0,7	0,6	0,39	0,5	—
NiO	0,5	0,61	—	—	2,8	—	0,7	—	—	1,0	—
CaF ₂	4,5	0,99	—	1,8	—	>100 % F ⁻ =2,4	4,0	3,5	7,68	4,5	>100 % F ⁻ =3,2
ZrO ₂	6,0	0,59	—	—	—	—	—	—	1,2	—	3,5
SrO	—	—	—	1,75	—	—	1,5	—	—	—	—
P ₂ O ₅	—	—	—	0,7	1,0	—	—	2,0	—	—	4,5
ZnO	—	—	—	1,25	1,5	—	—	—	—	—	2,0
Na ₂ SiF ₆	—	—	—	—	8,0	—	3,0	—	—	—	—

Контрольні завдання

1. З використанням правила адитивності розрахувати склад скляної шихти за хімічним складом скла (мас. %): SiO_2 – 72,0; Al_2O_3 – 0,2; Na_2O – 7,2; MgO – 0,45; CaO – 1,55; B_2O_3 – 8,15; K_2O – 10,45. Додаткові дані див. в таблиці додатка А.

2. Проведіть розрахунки шихти для виготовлення листового скла такого хімічного складу (мас. %): SiO_2 – 71; Al_2O_3 – 1,5; Na_2O – 15,5; CaO – 10,5; MgO – 1,5. Визначте втрати шихти на вигорання та винесення. Хімічний склад сировини наведений в таблиці додатка А.

3. Проведіть розрахунки шихти для виготовлення медичного скла такого хімічного складу (мас. %): SiO_2 – 73,0; B_2O_3 – 4,0; CaO – 7,0; MgO – 1,0; K_2O – 2,0; Na_2O – 8,5; Al_2O_3 – 3,0; ZnO – 1,5. Визначте втрати шихти на вигорання та винесення. Хімічний склад сировини наведений в таблиці додатка А.

4. Проведіть розрахунки шихти для виготовлення хіміко-лабораторного скла такого хімічного складу (мас. %): SiO_2 – 75,7; B_2O_3 – 6,8; CaO – 1,3; BaO – 2,0; K_2O – 1,2; Na_2O – 6,2; Al_2O_3 – 5,2; PbO – 1,6. Визначте втрати шихти на вигорання та винесення. Хімічний склад сировини наведений в таблиці додатка А.

5. Проведіть розрахунки шихти для виготовлення оптичного скла такого хімічного складу (мас. %): SiO_2 – 72,0; B_2O_3 – 8,15; CaO – 1,55; K_2O – 4,0; Na_2O – 7,2; Al_2O_3 – 6,45; MgO – 0,4; As_2O_3 – 0,2; SO_2 – 0,2. Визначте втрати шихти на вигорання та винесення. Хімічний склад сировини наведений в таблиці додатка А.

6. Проведіть розрахунки шихти для виготовлення тарного скла такого хімічного складу (мас. %): SiO_2 – 73,0; CaO – 6,6; Na_2O – 14,4; Al_2O_3 – 2,3; MgO – 3,4; Fe_2O_3 – 0,1. Визначте втрати шихти на вигорання та винесення. Хімічний склад сировини наведений в таблиці додатка А.

7. Проведіть розрахунки шихти для виготовлення сортового скла такого хімічного складу (мас. %): SiO_2 – 54,5; K_2O – 15,5; Al_2O_3 – 0,5; PbO – 24,0; ZnO – 1,0; B_2O_3 – 1,0; SO_2 – 0,5. Визначте втрати шихти на вигорання та винесення. Хімічний склад сировини наведений в таблиці додатка А.

8. Проведіть розрахунки шихти для виготовлення електровакуумного скла такого хімічного складу (мас. %): SiO_2 – 88,7; B_2O_3 – 10,5; Al_2O_3 – 0,3; Na_2O – 0,5. Визначте втрати шихти на вигорання та винесення. Хімічний склад сировини наведений в таблиці додатка А.

9. Проведіть розрахунки шихти для виготовлення світлотехнічного скла такого хімічного складу (мас. %): SiO_2 – 74,1; K_2O – 15,5; Al_2O_3 – 1,3; CaO – 7,0; MgO – 2,1; Na_2O – 15,5; As_2O_3 – 0,5. Визначте втрати шихти на вигорання та винесення. Хімічний склад сировини наведений в таблиці додатка А.

Розрахунок кількості шихти залежно від кількості зворотного склобою

Для прискорення процесу варіння скла та економії матеріальних, енергетичних ресурсів у скловарні печі додають 20–30 % склобою. В останні роки все більша кількість склотарних заводів використовують підвищений вміст склобою, навіть до 100 %. Склобій, який завантажується в піч, повинен бути чистим, вільним від домішок, що забруднюють його. Доцільно застосувати бій однакового складу зі склом, яке виготовляється.

У практиці скловаріння доводиться визначати кількість шихти, яку необхідно завантажувати в піч за одиницю часу залежно від необхідної кількості скломаси та склобою, який вводять. Якщо кількість склобою дається від маси шихти, то користуються формулою:

$$q = \frac{m(100-n)}{100} + \frac{mp}{100}, \quad (1.1)$$

а якщо від ваги скломаси, то формулою:

$$q = \frac{m(100-n)}{(100-p')}, \quad (1.2)$$

де q – кількість скломаси, яку одержують в одиницю часу, кг;

m – кількість шихти, яка завантажується в піч за одиницю часу, кг;

n – вигар шихти, мас. %; p – кількість склобою від маси шихти;

p' – кількість склобою від маси скла, мас. %.

Приклади розрахунку

Приклад 1. Добова продуктивність печі складає 120 т скломаси. Кількість склобою – 40 % від маси шихти, вигар – 20 %. Визначити годинний вихід шихти (m).

Обчислюємо годинну продуктивність печі, кг.

$$q = \frac{120000}{24} = 5000 \text{ кг/Г.}$$

Користуючись формулою (2.23), знаходимо:

$$5000 = \frac{m(100-20)}{10} + \frac{m \cdot 40}{100},$$

$$5000 = 0,8m + 0,4m = 1,2 m.$$

Звідси $m = 4166,2$ кг/год.

Приклад 2. Визначити годинний вихід скломаси, що одержують з 2000 кг шихти, вигар якої складає 20 %, а кількість склобою – 30 % від ваги скломаси.

Користуючись формулою (1.2), знаходимо:

$$q = \frac{2000(100-20)}{(100-30)} = 2285 \text{ кг/Год.}$$

Контрольні завдання

1. Для печі продуктивністю 72 т скломаси на добу визначити годинні витрати шихти, якщо кількість склобою, що вводять, складає 27 % від ваги скломаси, а вигар шихти – 30 %.
2. Визначити годинний вихід скломаси, що одержують з 96 т шихти на добу, вигар якої складає 30 %, а кількість склобою, який вводять, від маси шихти – 40 %.
3. Розрахувати годинні витрати шихти для печі продуктивністю 100 т скломаси на добу при вигарі шихти 28 % та кількості склобою, який вводиться, 35 %.
4. Визначити годинний вихід скломаси, яку одержують з 180 т на добу шихти, вигар якої складає 27 %, а кількість склобою, який вводять, від маси шихти – 32 %.
5. Розрахувати годинні витрати шихти для печі продуктивністю 120 т скломаси на добу при вигарі шихти 26 % та кількості склобою, який вводиться, 15 %.
6. Розрахувати кількість склобою, який необхідно ввести у шихту від її маси, якщо продуктивність печі складає 80 т на добу, а витрати шихти – 2,8 т/годину при її вигарі 21 %.
7. Визначити кількість шихти для завантажування в піч за годину, якщо кількість скломаси, яка виплавляється, складає 130 т на добу, зворотного бою – 43 %, а вигар – 19 %.
8. Для печі продуктивністю 170 т скломаси на добу визначити годинні витрати шихти, якщо кількість склобою, що вводять, складає 22 % від ваги скломаси, а вигар шихти – 25 %.
9. Розрахувати кількість склобою, який необхідно ввести у шихту від її маси, якщо продуктивність печі складає 165 т на добу, а витрати шихти – 9,5 т/годину при її вигарі 25 %.

10. Визначити кількість шихти для завантажування в піч за годину, якщо кількість скломаси, яка виплавляється, складає 90 т на добу, зворотного бою – 33 %, а вигар – 22 %.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ СКЛОВИРОБІВ

2.1 Розрахунок технологічних параметрів формування скловиробів

До найважливіших стадій одержання скловиробів з шихти належать: варіння скла з кристалічних сировинних матеріалів, яке включає силікатоутворення та склоутворення з наступним освітленням та гомогенізацією склорозплаву, а також (після певного остудження) формування скловиробів.

Формування – це процес перетворення розплавленої скломаси в твердий виріб потрібної форми. При цьому мають місце формування та фіксація форми в процесі твердіння.

Методи гарячого формування скловиробів включають відливку, пресування, прокатку, видування, пресовидування, витягування, центробіжне формування, флоат-процес, роздування, ручне (гутне) формування, екструзію, вспінювання, молірування тощо.

Основною технологічною характеристикою промислових стекол, яка визначає процеси варіння й вироблення і, відповідно, вихід придатної продукції, є температурний хід їх в'язкості, або технологічна шкала в'язкості. Окремим етапам технологічної обробки стекол відповідають так звані характеристичні точки й температурні інтервали, які визначають типову поведінку скла і його розплаву на різних стадіях технологічного процесу та прийняті як міжнародні (табл. 2.1).

До них, зокрема, належать:

$T_{\text{варіння}}$ – технологічна температура варіння скла (ТТВС). Чисельно цей параметр дорівнює температурі, при якій в'язкість скла конкретного складу дорівнює 10 Па·с. Вище цієї температури оптимальне видалення бульбашок з розплаву і його гомогенізація важкодоступні. Максимальна температура (T_{max}) в промисловій скловарній печі, як правило, підтримується трохи вище, ніж ТТВС. Чим вище різниця між цими параметрами, тим швидше йде варіння скла і з'являється додаткова можливість для збільшення продуктивності скловарної

печі й, відповідно, більш ефективної експлуатації сучасного високопродуктивного склоформуючого устаткування. В умовах реального виробництва потрібно також урахувати, що підвищення в'язкості призводить до збільшення, а її зниження – до зменшення тривалості процесу корозії вогнетривких матеріалів, що перебувають у контакті зі скломасою. Тому необхідно здійснювати вибір T_{\max} з урахуванням як $T_{\text{варіння}}$ (ТТВС) скла, так і вогнетривкої кладки для кожної конкретної печі індивідуально.

$T_{\text{Літ}}$ – температура Літтона, якій відповідає той ступінь в'язкості ($10^{6,65}$ Па·с), при якому явна деформація скла настає під його власною масою і позначається як температура розм'якшення.

$T_{\text{краплі}}$ – відповідає значенню в'язкості 10^2 Па·с і характеризує для виробництва тарних стекол температуру формування краплі, для листових – «цибулини» скла.

$T_{\text{в.в}}$ – верхня температура відпалу (10^{12} Па·с).

$T_{\text{н.в}}$ – нижня температура відпалу ($10^{13,5}$ Па·с). Ці температури обмежують критичну зону відпалу скла. Нижче $T_{\text{н.в}}$ і вище $T_{\text{в.в}}$ за період реального відрізка часу цієї технологічної операції релаксація залишкових напруг у склі неможлива.

Основною відпрацьованою характеристикою для тарних стекол, яка визначає інтенсивність процесу формування скла конкретного складу, вважається відносна швидкість склоформуючої машини [13]. За фізичним змістом її можна назвати порівняльною швидкістю склоформуючої машини (ПШСМ), %. Вона визначається таким емпіричним рівнянням:

$$\text{ПШСМ} = \frac{T_{\text{Літ}} - 450}{\text{ТІФ} + 80} \cdot 100, \quad (2.1)$$

де ТІФ – температурний інтервал формування – індекс, що визначає інтервал фіксації форми виробу.

Для більшості промислових складів тарних стекол температурний інтервал формування, як правило, перевищує 160°C і визначається за формулою:

$$\text{ТІФ} = T_{\text{Літ}} - T_{\text{в.в}} \quad (2.2)$$

Таблиця 2.1 – Характеристичні точки технологічної шкали в'язкості стекол

Назва технологічного процесу і характеристичні температури	В'язкість, Па·с	Позначення, символи
Варіння, освітлення і гомогенізація скломаси	10	ТТВС
Інтервал формування ручного і механізованого: початок кінець	10^2 10^8	$T_{\text{краплі}}$
Ручне формування дрібних виробів (скломаса придатна для машин з вакуумним живленням)	10^2	
Ручне формування скла (при цій в'язкості скло має консистенцію тіста)	$10^{2,5}$	
Формування виробів на машинах з крапельним живленням	10^3	
Обробка скла на пальниках	10^4	
Скло набуває форми та зберігає її впродовж короткого часу	10^5	
Скло можна ще пресувати, але воно дуже тверде	10^6	
Температура Літлтона	$10^{6,65}$	$T_{\text{Літ}}$
В'язкість, при якій лист скла можна ще гнути	10^7	
Спікання скла	$10^7 - 10^{11}$	
Температура початку пом'якшення	10^8	T_f
Дилатометрична температура початку деформації	10^{10}	T_d
Початок формування скла під впливом власної ваги	10^{10}	
Температура склування	$10^{12,3}$	T_g
Інтервал склування	$10^8 - 10^{12}$	
Відпал: вища температура відпалу нижча температура відпалу	10^{12} $10^{13,5}$	$T_{\text{в.в}}$ $T_{\text{в.н}}$
Верхня межа крихкого стану	10^{14}	
Температура деформації	$10^{14,6}$	
Значне зменшення зростання в'язкості при подальшому зниженні температури	10^{15}	
В'язкість при температурі довкілля	10^{19}	

Важливо, щоб в умовах виробництва скловиробів значення ПШСМ максимально наближались до 100 % і навіть перебільшували цей показник при формуванні. Практично значення цього показника знаходиться в межах 96–108 °С. Воно суттєво залежить від складу скла, який визначає так звану «довжину», тобто температурний інтервал, в межах якого в'язкість збільшується від 10^2 до 10^8 Па·с. «Довгі» стекла мають температурний інтервал 250–600 °С, «короткі» – приблизно 100÷150 °С. Розробка режиму формування для «довгого» скла значно простіша, ніж для «короткого».

В умовах високопродуктивного процесу формування склотари великого значення набуває показник ІК, що оцінює можливість кристалізації скла (індекс кристалізації).

$$ІК = ТІФ - 160 \quad (2.3)$$

При позитивному значенні ІК виключається небезпека кристалізації скла в процесі вироблення, при негативному – можлива кристалізація скломаси в живильнику.

Приклади розрахунків

Приклад 1. Розрахунок порівняльної швидкості склоформуючої машини при виробленні коричневої склотари. Вихідні дані: температурний інтервал формування $ТІФ = 185$ °С; температура Літтона $T_{Літ} = 710$ °С.

Порівняльну швидкість склоформуючої машини ПШСМ розраховуємо з використанням вихідних даних за формулою:

$$ПШСМ = \frac{T_{Лит} - 450}{ТІФ + 80} \cdot 100 \%;$$

$$ПШСМ = \frac{710 - 450}{185 + 80} \cdot 100 = 98,1 \; \%.$$

Таким чином, порівняльна швидкість склоформуючої машини дорівнює 98,1 %.

Приклад 2. Оцінка можливості кристалізації при формуванні коричневої склотари. Вихідні дані: температурний інтервал формування склотари $ТІФ = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для оцінки можливості кристалізації при формуванні виробу з даного скла необхідно розрахувати значення індексу кристалізації ІК за формулою (2.1):

$$ІК = 180 - 150 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Оскільки значення ІК є позитивним, кристалізація скла в процесі вироблення не відбувається.

Приклад 3. Приклад розрахунку температурного інтервалу формування (інтервалу фіксації форми). Вихідні дані: температура Літтона $T_{Літ} = 690\text{ }^{\circ}\text{C}$; верхня температура випалу $T_{в.в} = 530\text{ }^{\circ}\text{C}$; скло – тарне прозоре.

Розрахунок температурного інтервалу формування пляшок виконуємо за формулою (2.2):

$$ТІФ = 690 - 530 = 160\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Таким чином, ТІФ даного виробу складає $160\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Контрольні завдання

1. Розрахувати порівняльну швидкість склоформуючої машини при виробленні безбарвної склотари. Вихідні дані: температурний інтервал формування $ТІФ = 176\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура Літтона $T_{Літ} = 725\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Обчислити порівняльну швидкість склоформуючої машини при виробленні коричневої склотари. Вихідні дані: температурний інтервал формування $ТІФ = 172\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура Літтона $T_{Літ} = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Розрахувати порівняльну швидкість склоформуючої машини при виробленні пляшок синього кольору. Вихідні дані: температурний інтервал формування $ТІФ = 179\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура Літтона $T_{Літ} = 729\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Оцінити можливість кристалізації при формуванні склотари. Вихідні дані: тип тари – напівпрозорі банки, температурний інтервал формування ТІФ = 182 °С.
5. Оцінити можливість кристалізації при формуванні склотари. Вихідні дані: тип тари – коричневі пляшки, температурний інтервал формування ТІФ = 173 °С.
6. Оцінити можливість кристалізації при формуванні склотари. Вихідні дані: тип тари – сині пляшки, температурний інтервал формування ТІФ = 183 °С.
7. Оцінити можливість кристалізації при формуванні склотари. Вихідні дані: тип тари – зелені пляшки, температурний інтервал формування ТІФ = 174 °С.
8. Розрахувати температурний інтервал формування ТІФ, або інтервал фіксації форми скловиробу. Вихідні дані: скло – тарне напівпрозоре, виріб – банка, температура Літтона $T_{\text{Літ}} = 721$ °С, верхня температура відпалу $T_{\text{в.в}} = 528$ °С
9. Розрахувати температурний інтервал формування ТІФ, або інтервал фіксації форми скловиробу. Вихідні дані: скло – тарне оливкове, виріб – пивна пляшка, температура Літтона $T_{\text{Літ}} = 740$ °С; верхня температура відпалу $T_{\text{в.в}} = 516$ °С.
10. Розрахувати температурний інтервал формування ТІФ, або інтервал фіксації форми скловиробу. Вихідні дані: скло – тарне темнозелене, виріб – пляшка для шампанського, температура Літтона $T_{\text{Літ}} = 742$ °С; верхня температура відпалу $T_{\text{в.в}} = 518$ °С.

2.2 Розрахунок температури та режиму відпалу скла

Нерівномірне охолодження поверхневих і внутрішніх шарів скла викликає виникнення напруг стиску й розтягнення. Коли скло повністю охолоджується і температура різних шарів вирівнюється, напруги, що виникають при охолодженні, можуть або залишитися або зникнути. У першому випадку напруги називають залишковими, у другому – тимчасовими.

Залишкові напруги виникають у склі в результаті його переходу з пластичного стану в крихкий, тобто коли скломаса поступово втрачає свою

рухливість і не зникають при подальшому охолодженні крихкого скла при будь-якій швидкості охолодження. Чим швидше відбувається охолодження і чим товще виріб, тим більше різниця температур між поверхневими й внутрішніми шарами і, отже, тим вища залишкова напруга в склі. При дуже повільному охолодженні виробів різниця температур між поверхневими й внутрішніми шарами скла значно зменшується й залишкові напруги стають мізерно малими.

Залишкові напруги можуть зникнути тільки після вторинного нагрівання скла до температури, при якій скломаса знову стає рухливою і можливі пластичні деформації. При температурі вище 550–600 °С в'язкість більшості стекол є достатньою для забезпечення миттєвого зникнення залишкових напруг.

Тимчасові напруги виникають у процесі подальшого охолодження вже крихкого скла, коли рухливість скломаси практично дорівнює нулю, але різниця температур між поверхневими й внутрішніми шарами ще існує. При усуненні різниці температур тимчасові напруги зникають.

Скляні вироби, відформовані ручним або машинним способом, відпалюють у спеціальних печах для усунення, послаблення або вирівнювання внутрішніх напруг, що виникають при їхньому виготовленні. Відпал скляних виробів залежить від особливостей технологічного процесу виготовлення і може здійснюватися або безпосередньо після формування (первинний відпал), або після повного охолодження виробів (вторинний відпал). Для вторинного відпалу вироби нагрівають повторно.

Основними показниками режиму відпалу скляних виробів є температура відпалу і режим охолодження. Температура відпалу залежить від хімічного складу скла і товщини виробу, а режим охолодження, тобто сам процес відпалу – від вимог, які висувають до відпаленого виробу, його товщини, температури відпалу й конструкції печі.

Для встановлення режиму відпалу виробу визначають температурний інтервал, в якому можуть виникнути або зникнути залишкові напруги.

Цей інтервал характеризується двома критичними температурами відпалу: верхньою й нижньою.

Верхньою температурою відпалу називають температуру, при якій протягом 3 хв зникає 95 % залишкових напруг. Вона відповідає в'язкості скла 10^{12} Па·с. Нижньою температурою відпалу є температура, при якій за той же час зникає 1% напруг. При цій температурі в'язкість складає 10^{14} Па·с. Обидві температури визначаються на підставі лабораторних досліджень.

Верхня температура відпалу може бути орієнтовно встановлена розрахунковим шляхом з урахуванням ступеня впливу окремих склаутворюючих оксидів. Для більшості стекл верхня температура відпалу знаходиться в межах 520–580 °С, а нижня – на 50–150 °С нижче за цю температуру.

На рисунку 2.1 наведено верхню температуру відпалу залежно від хімічного складу скла.

Процес відпалу скляних виробів після повного охолодження складається з чотирьох стадій:

- нагрівання до верхньої температури відпалу;
- витримування при цій температурі протягом деякого проміжку часу;
- повільного охолодження при пластичному стані скла;
- прискореного охолодження після переходу скла у крихкий стан.

Якщо при формуванні виріб, наприклад стрічка листового скла, рівномірно прогрівся, то процес відпалу проводиться у три стадії:

- охолодження до температури початку відпалу;
- повільне охолодження при пластичному стані;
- прискорене охолодження при крихкому стані.

Слід зазначити, що режими відпалу, одержані за розрахунками, є приблизними й остаточно уточнюються у виробничих умовах залежно від типу печі відпалу, точності підтримки температури, з урахуванням одержання припустимого рівня напруг.

Номер складу	Хімічний склад скла, мас. %													Верхня температура відпалу, °C
	SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	BaO	PbO	B ₂ O ₃	MnO	ZnO	As ₂ O ₃	
1	74,25	7,91	—	12,72	—	23	0,07	—	—	—	—	—	—	560
2	66,33	17,28	—	15,89	—	0,52	0,06	—	—	—	—	—	—	496
3	82,83	0,02	—	16,98	—	0,28	0,08	—	—	—	—	—	—	522
4	72,29	9,76	—	15,65	—	0,72	0,06	—	—	—	1,02	—	—	560
5	74,59	10,38	0,3	14,22	—	0,45	0,21	—	—	—	—	—	—	581
6	67,78	—	—	18,65	—	0,46	0,08	—	12,56	—	—	—	—	465
7	75,38	8,4	—	6,14	9,38	0,65	0,07	—	—	2,05	—	—	—	588
8	57,87	—	—	9,55	—	0,98	—	—	—	31,26	—	—	—	523
9	64,00	7	—	11,5	—	10	—	—	—	7	—	—	—	630
10	71,00	10,1	—	—	18,6	—	—	—	—	—	—	—	0,3	610
11	59,34	—	—	12,31	—	0,42	0,06	—	27,77	—	—	—	—	446
12	66,45	5,4	—	7,85	13,7	1,5	—	—	—	1,1	—	3,8	0,2	535
13	72,00	1,55	0,45	7,2	10,45	—	—	—	—	8,15	—	—	0,2	560
14	68,95	—	—	10,4	6,5	—	—	2,8	—	11	—	—	0,35	560
15	52,93	—	—	—	9,6	—	—	—	35,75	1,45	—	—	0,25	490
16	47,00	—	—	—	6,35	—	—	—	46,4	—	—	—	0,25	485
17	53,85	—	—	2,4	7,95	—	—	19	—	12,75	—	3,65	0,2	560
18	49,55	—	—	1,25	7,55	—	—	21,55	2,6	4,8	—	12,5	0,2	560
19	67,50	—	—	15,4	—	—	—	—	12,3	—	—	4,6	0,2	460

Рисунок 2.1 – Верхня температура відпалу різних промислових стекол

Залежність верхньої температури відпалу від складу скла показано на рисунку 2.2. Остаточню верхню температуру відпалу можна приблизно визначити з використанням даних Гельгофа і Томаса, наведених в таблиці 2.2.

Номер складу	Вміст оксиду, %											Верхня температура відпалу, °C
	SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	B ₂ O ₃	PbO	ZnO	As ₂ O ₃	
1	64,5	7	—	11,5	-	10	-	7	—	—	-	630
2	62,43	8,9	—	6,26	8,06	0,62	0,08	13,65	—	—	-	610
3	71,00	10,1	—	-	18,6	—	—	—	—	—	0,3	610
4	73,31	8,4	—	6,14	9,38	0,65	0,07	2,05	—	—	—	588
5	74,74	10,38	—	14,22	—	0,45	0,21	—	—	—	—	581
6	68,52	10,26	—	16,22	—	2,5	2,1	—	—	—	—	570
7	73,96	9,74	—	13,54	—	2,67	0,09	—	—	—	—	562
8	74,07	7,91	—	12,72	—	5,23	0,07	—	—	—	—	560
9	72,00	1,55	0,45	7,2	10,45	-	—	8,15	—	—	0,2	560
10	73,00	7	2,5	14,5	—	3	—	—	—	—	—	560
11	66,45	5,4	—	7,85	13,7	1,5	—	1,1	-	3,8	0,2	535
12	75,00	7,52	1,64	14,84	—	9,3	0,08	—	-	—	—	524
13	82,64	0,02	—	16,98	—	0,28	0,08	—	-	—	—	522
14	66,25	17,28	—	15,89	—	0,52	0,06	—	-	—	—	496
15	59,44	—	—	12,31	—	0,42	0,06	—	27,77	—	—	446
16	31,60	—	—	—	2,85	—	—	—	65,35	—	—	370

Рисунок 2.2 – Верхня температура відпалу залежно від вмісту оксидів у склі

Таблиця 2.2 – Зміна верхньої температури відпалу, °С, при заміні 1 % SiO₂ на 1 % іншого оксиду (за Гельгофом й Томасом)

Оксид	Вміст оксиду, %								
	0–5	5–10	10–15	15–20	20–25	25–30	30–35	35–40	40–50
Na ₂ O	–	–	– 4	– 4	– 4	– 4	–	–	–
K ₂ O	–	–	–	– 3	– 3	– 3	–	–	–
MgO	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	–	–	–	–
CaO	7,8	6,6	4,2	1,8	0,4	–	–	–	–
ZnO	2,4	2,4	2,4	1,8	1,2	0,4	–	–	–
BaO	1,4	–	–0,2	–0,9	–1,1	– 1,6	–2	–2,6	–
PbO	–0,8	–1,4	–1,8	–2,5	–2,6	– 2,8	–3	–3,1	–3,1
B ₂ O ₃	8,2	4,8	2,6	0,4	–1,5	– 1,5	– 2,6	–2,6	–2,8
Al ₂ O ₃	3	3	3	3	–	–	–	–	–
Fe ₂ O ₃	–	–	–0,6	–1,7	–2,2	–2,8	–	–	–

Для розрахунку температурно-часових режимів відпалу листового скла, склотарних і побутових виробів використовуються такі позначення:

- t_v і t_n – верхня й нижня температури відпалу, °С;
- $t'_{\text{вир}}$ і $t''_{\text{вир}}$ – температура виробів до й після відпалу, °С;
- $\alpha' = \alpha \cdot 10^7$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення, °С⁻¹
($\alpha = 90 \cdot 10^{-7}$ °С⁻¹, $\alpha' = 90$ °С⁻¹);

- a_{max} – максимальна товщина стінки виробу, см;
- $a_{\text{ср}}$ – середня товщина стінки виробу, см;
- v, v_1, v_3, v_4 – швидкості охолодження (нагрівання) виробів, °С/хв;
- $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ – час охолодження (нагрівання) або витримки виробу, хв.

Розрахунок режимів відпалу можна вести двома способами. За першим способом швидкість і час нагрівання та охолодження розраховують за емпіричними формулами для кожної стадії відпалу. За другим способом спочатку визначають швидкість охолодження на третій стадії. Залежно від неї визначають швидкість нагріву та охолодження на першій і четвертій стадіях. Температуру виробів $t''_{\text{вир}}$ можна приймати 40 °С.

Формули для розрахунків режимів відпалу зведені до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Формули для розрахунку режимів відпалу

Стадія відпалу	Розрахункові формули для способу	
	першого	другого
1. Швидкий нагрів (охладження) до верхньої температури відпалу	$v_1 = \frac{20}{a_{\max}} \div \frac{30}{a_{\max}}$ <p>Нагрів $\tau_1 = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{вир}}}{v_1}$</p> <p>Охолодження $\tau_1 = \frac{t_{\text{вир}} - t_{\text{в}}}{v_1}$</p>	$v_1 = 10 v_3$
2. Витримка виробів при верхній температурі відпалу	$\tau_2 = 70 \div 120 \left(\frac{a_{\max}}{2} \right)^2$ <p>Зазвичай $\tau_2 = 120 \left(\frac{a_{\max}}{2} \right)^2$</p>	$\tau_2 = 28 a_{\text{сер}} - 3$
3. Повільне охолодження	$v_3 = 1,3 / a_{\max}^2$ $\tau_3 = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{v_3}$	$v_3 = \frac{40}{\alpha' \cdot a_{\text{сер}}^2}$
4. Швидке охолодження	$v_4 = \frac{10}{a_{\max}} \div \frac{15}{a_{\max}^2}$ <p>можна прийняти:</p> $v_4 = 20 - 60 \text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ $\tau_4 = \frac{t_{\text{н}} - t_{\text{вир}}}{v_4}$	$v_4 = 10 v_3$

Розрахунок режимів відпалу термічно полірованого скла базується на тих же принципах, що і попередній розрахунок, але в даному випадку в розрахунок введено допустимий рівень залишкових напруг.

Час витримки скла при верхній температурі відпалу:

$$\tau_2 = \frac{520a^2}{\Delta}, \quad (2.4)$$

де a – напівтовщина скла, см;

Δ – різниця ходу променів, (нм/см), яка відповідає допустимому значенню залишкових напруг.

Початкова швидкість повільного охолодження від верхньої температури відпалу в інтервалі 10 °С:

$$v_3 = \frac{\Delta}{13a^2} \quad (2.6)$$

Подальша швидкість охолодження до нижньої температури відпалу через кожні 10 °С зростає в 1,2; 1,5; 1,9; 2,5; 3,3; 4,5; 6,1; 8,5 рази. Початкова швидкість охолодження від нижньої температури відпалу:

$$v_4 = 8,5 \cdot v_2. \quad (2.7)$$

Максимально припустима швидкість швидкого охолодження в інтервалі 478–100 °С:

$$v_4 = \frac{200}{13 \cdot a^2}. \quad (2.8)$$

Приклади розрахунків

Приклад 1. Розрахунок верхньої температури відпалу тарного скла.

Вихідні дані: хімічний склад скла, мас. %: SiO₂ – 72,7; Al₂O₃ – 2,5; Fe₂O₃ – 0,3; CaO – 6,0; MgO – 4,0; Na₂O – 14,5.

За даними табл. 6.14 знаходимо склад скла, близький до заданого. Найбільше підходить склад № 10. Верхня температура відпалу цього скла дорівнює 560 °С. Кожний відсоток Al₂O₃ при вмісті його в склі 0–5 % підвищує температуру відпалу на 3 °С (див. табл. 6.15). Оскільки в заданому складі скла міститься 2,5 мас. % Al₂O₃, верхня температура відпалу скла знизиться на:

$$+ 3 (2,5 - 3) = -1,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Кожний відсоток CaO при вмісті його в склі 5–10 % підвищує температуру відпалу на 6,6 °С. У заданому склі міститься 6 мас. % CaO. Отже, верхня температура відпалу знизиться на:

$$+6,6 (6 - 7) = -6,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Кожний відсоток MgO при вмісті його в склі 0–5 % підвищує температуру відпалу на 3,5 °C. У заданому складі міститься 4 % MgO. Тому верхня температура відпалу підвищиться на:

$$+3,5 (4 - 2,5) = +5,25 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Вміст Na₂O в обох стеклах є однаковим, а вплив 0,3 % Fe₂O₃ не враховується.

Таким чином верхня температура відпалу заданого складу скла становитиме:

$$t_{\text{в}} = 560 - 1,5 - 6,6 + 5,25 \approx 557 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Приклад 2. Розрахунок режимів відпалу тарних виробів із скла, склад якого наведено в попередньому прикладі. Вихідні дані: $t_{\text{в}} = 557 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{н}} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t'_{\text{вир}} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t''_{\text{вир}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $a' = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $a_{\text{max}} = 0,5 \text{ см}$; $a_{\text{сер}} = 0,3 \text{ см}$.

Розрахунок за першим та другим способами подано в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати розрахунків режиму відпалу

Стадія відпалу	Результати розрахунків для способу	
	першого	другого
1	$V_1 = \frac{25}{a_{\text{max}}} = \frac{25}{0,5} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ $\tau_1 = \frac{557 - 450}{50} = 2,1 \text{ хв}$	$V_1 = 10v_3 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ $\tau_1 = \frac{557 - 450}{50} = 2,1 \text{ хв}$
2	$\tau_2 = 102 (0,25)^2 = 6,4 \text{ хв}$	$\tau_2 = \text{хв}$
3	$v_3 = \frac{1,33}{(0,5)^2} = 5,3 \text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ $\tau_3 = \frac{557 - 450}{5,3} = 20 \text{ хв}$	$v_3 = \frac{40}{90 \cdot 0,09} = 5,0 \text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ $\tau_3 = \frac{557 - 450}{5} = 21,4 \text{ хв}$
4	$v_4 = \frac{12}{(0,5)^2} = 48 \text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ $\tau_4 = \frac{450 - 40}{48} = 8,5 \text{ хв}$	$v_4 = 10v_3 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ $\tau_4 = \frac{450 - 40}{50} = 8,2 \text{ хв}$
	Загальний час відпалу $\tau = 37,0 \text{ хв}$	$\tau = 37,1 \text{ хв}$

Слід, однак, зазначити, що в практичних умовах час відпалу на всіх стадіях зростає внаслідок невизначеності температурних границь вздовж тунелю печі відпалу. Зазвичай час відпалу для прийнятих видів виробів складає залежно від точності підтримки температури 40–70 хв.

Приклад 3. Розрахунок режимів відпалу термічно полірованого скла.

Вихідні дані: хімічний склад скла, мас. % SiO_2 – 73,0; Al_2O_3 – 1,0; Fe_2O_3 – 0,1; CaO – 8,6; MgO – 3,6; Na_2O – 13,4; SO_3 – 0,3. Товщина скла – 6 мм. Прийняте значення залишкових напруг відповідає різниці ходу променів 10 нм/см.

Визначення верхньої температури відпалу здійснюється аналогічно попередньому розрахунку (найбільш близький склад за таблиці 2.2 має скло № 10). У результаті розрахунку визначаємо, що $t_b = 568^\circ\text{C}$.

Час витримки при верхній температурі відпалу визначаємо як:

$$\tau_2 = \frac{520a^2}{\Delta} = \frac{520 \cdot (0,3)^2}{10} = 4,7 \text{ хв}$$

Швидкість і час охолодження змінюються залежно від інтервалу температур. При досягненні нижньої температури відпалу швидкість і час охолодження стрічки скла складуть:

Інтервал температур, °C	Швидкість охолодження, °C/хв	Час охолодження, хв
568–558	8,5	1,18
558–548	$8,5 \cdot 1,2 = 10,2$	0,98
548–538	$8,5 \cdot 1,5 = 12,75$	0,78
538–528	$8,5 \cdot 1,9 = 16,15$	0,62
528–518	$8,5 \cdot 2,5 = 21,25$	0,47
518–508	$8,5 \cdot 3,3 = 28,05$	0,37
508–498	$8,5 \cdot 4,5 = 38,25$	0,26
498–488	$8,5 \cdot 6,1 = 51,85$	0,20
488–478	$8,5 \cdot 8,5 = 72,25$	<u>0,14</u>
разом:		5,00

Швидкість охолодження скла нижче 478 °C становить:

$$v_4 = 8,5 \cdot v_2 = 8,5 \cdot 8,5 = 72,25^\circ\text{C/хв.}$$

Максимально припустима швидкість охолодження в цьому інтервалі дорівнює:

$$v_4 = \frac{200}{13a^2} \approx 170 \text{ }^\circ\text{C/хв.}$$

Час швидкого охолодження стрічки скла до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ у закритій частині печі відпалу складе:

$$\frac{(478 - 100)}{72,25} = 5,2 \text{ хв}$$

Загальний час відпалу скла в закритій частині печі становить:

$$4,7 + 5 + 5,2 \approx 15 \text{ хв}$$

Нижче $100 \text{ }^\circ\text{C}$ скло охолоджують на відкритому конвеєрі печі відпалу, обдуваючи стрічку скла з обох боків повітрям. З урахуванням швидкості руху стрічки скла можна визначити довжину печі відпалу. Наприклад, якщо швидкість руху стрічки скла становить 350 м/год при товщині скла 6 мм , довжина закритої частини печі відпалу складе:

$$\frac{350 \cdot 15,2}{60} = 87,5 \text{ м.}$$

Якщо прийняти величину залишкових напруг, що відповідає різниці ходу 20 нм/см , то довжина печі скоротиться вдвічі (або швидкість витягування може бути збільшена у два рази).

Контрольні завдання

1. Розрахувати верхню температуру відпалу віконного скла складу, мас.% : $\text{SiO}_2 - 72,3$; $\text{NaO} - 14,5$; $\text{CaO} - 7$; $\text{MgO} - 4$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 2$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,2$.

2. Визначити режим відпалу тарного скла, який має: $t_{\text{в}} - 570 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{н}} - 460 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{виробу}} - 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $a_{\text{max}} - 0,6 \text{ см}$; $a_{\text{сер}} - 0,4 \text{ см}$; $\alpha' = 92 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

3. Розрахувати верхню температуру відпалу оптичного скла складу, мас.%: $\text{SiO}_2 - 72$; $\text{Na}_2\text{O} - 7,5$; $\text{K}_2\text{O} - 10,0$; $\text{B}_2\text{O}_3 - 8,0$; $\text{MgO} - 0,45$; $\text{CaO} - 1,55$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,5$.

4. Розрахувати нижню температуру відпалу скла, якщо вона на $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ нижча за верхню. Склад скла, мас. %: $\text{SiO}_2 - 31,5$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,3$; $\text{PbO} - 65$; $\text{K}_2\text{O} - 3,2$.

5. Розрахувати час охолодження від верхньої до нижньої температури відпалу медичного скла складу, мас. %: $\text{SiO}_2 - 73$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 4,5$; $\text{B}_2\text{O}_3 - 4,0$; $\text{Na}_2\text{O} - 8,5$; $\text{CaO} - 7$; $\text{K}_2\text{O} - 2$; $\text{MgO} - 1$, якщо максимальна товщина скла дорівнює 2 мм .

6. Розрахувати швидкість нагрівання або охолодження стрічки скла до верхньої температури відпалу за двома способами, якщо максимальна товщина скла складає 4 мм .

7. Розрахувати тривалість витримки листового скла при верхній температурі відпалу ($560\text{ }^{\circ}\text{C}$), якщо середня товщина стінки скла складає 6 мм .

8. Розрахувати режим охолодження скловиробів від верхньої температури відпалу, якщо максимальна товщина їх складає 3 мм , а $t_{\text{в}} - t_{\text{н}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9. Розрахувати швидкість охолодження від верхньої до нижньої температури відпалу листового скла з середньою товщиною 5 мм , якщо ТКЛР його складає $85 \cdot 10^{-7}\text{ }1/^{\circ}\text{C}$.

10. Розрахувати за двома способами швидкість охолодження листового скла від нижньої температури відпалу, якщо максимальна товщина його складає 3 мм .

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Матвеев М. А. Расчеты по химии и технологии стекла / М. А. Матвеев, Г. М. Матвеев, Б. Н. Френкель. – М. : Стройиздат, 1972.– 240 с.
2. Дудеров Ю. Г. Расчеты в технологии керамики : справ. пособ. / Ю. Г. Дудеров, И. Г. Дудеров. – М. : Стройиздат, 1973.– 80 с.
3. Ящишин Й. М. Технологія скла: підручник у трьох частинах. – ч.2: Технологія скляної маси:. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2004. – 250 с.
4. Ящишин Й. М. Технологія скла: підручник у трьох частинах. – ч.3: Технологія скляних виробів. – Львів : Видавництво «Растр-7», 2011. – 416 с.
5. Химическая технология стекла и ситаллов / Под ред. Н. М. Павлушкина. – М. : Стройиздат, 1983. – 432 с.
6. Павлушкин Н. М. Практикум по технологии стекла и ситаллов / Н. М. Павлушкин, Г. Г. Сентюрин, Р. Я. Ходаковская – М. : Изд-во литературы по строительству, 1970. – 509 с.
7. Хімічна технологія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів прикладах і задачах: навч. пос. у 2 ч. / Федоренко О. Ю., Пітак Я. М., Рищенко М. І. та ін.; за ред. М. І. Рищенко Ч.2 Фізико-хімічні системи, фазові рівноваги, термодинаміка, ресурсо- та енергозбереження в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів. – Харків: НТУ «ХП», 2013. – 326 с

ДОДАТОК А

Таблиця А1 –Характеристика матеріалів, що використовуються при виготовленні стекол, глазурних та емалевих фрит

Найменування матеріалу	Хімічна формула	Молекулярна маса	Щільність, $d \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	Вміст компонентів, які вводяться в емаль на 100 мас. ч. матеріалу	Шихтний множник
Алюмінію оксид	Al ₂ O ₃	101,94	3,7-4,0	100,0 Al ₂ O ₃	1,00
Алюмінію гідроксид	Al(OH) ₃	77,99	2,5	65,4 Al ₂ O ₃	1,53
Арсену оксид (III)	As ₂ O ₃	197,82	4,1	100,0 As ₂ O ₃	1,00
Аурум хлористий	AuCl ₃	303,60	3,9	64,9 Au	1,54
Барій азотнокислий	Ba(NO ₃) ₂	261,38	3,2	58,7 BaO	1,70
Барій вуглекислий	BaCO ₃	197,37	4,2-4,4	77,7 BaO	1,29
Борна кислота	H ₃ BO ₃	61,84	1,4	56,3 B ₂ O ₃	1,78
Бура кристалічна	Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	38,44	1,7	36,5 B ₂ O ₃ ; 16,2 Na ₂ O	2,74; 6,15
Бура кальцинована	Na ₂ B ₄ O ₇	201,27	2,4	69,2 B ₂ O ₃ ; 30,8 Na ₂ O	1,45; 3,25
Глинозем	Al ₂ O ₃	101,94	3,7...4,0	100,0 Al ₂ O ₃	1,00
Кальцій вуглекислий	CaCO ₃	100,09	2,6-3,8	56,0 CaO	1,78
Кальцій фтористий	CaF ₂	78,08	3,2	71,8 CaO; 48,7 F-	1,39; 2,05
Кріоліт	Na ₃ AlF ₆	210,10	2,9	24,3 Al ₂ O ₃ ; 44,3 Na ₂ O; 54,3 F-	4,10; 2,26; 1,84
Кобальту оксид	Co ₂ O ₃	165,88	5,2	100 Co ₂ O ₃	1,00
Літій вуглекислий	Li ₂ CO ₃	73,89	2,1	40,6 Li ₂ O	2,47
Натрій вуглекислий	Na ₂ CO ₃	106,0	2,5	58,5 Na ₂ O	1,71
Натрій азотнокислий	NaNO ₃	85,01	2,3	36,5 Na ₂ O	2,74
Натрій фосфорнокислий три-заміщений гідрат	Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O	380,16	1,6	24,1 Na ₂ O; 18,7 P ₂ O ₅	4,15; 5,35
Натрій кремнефтористий	Na ₂ SiF ₆	188,10	2,7	33,0 Na ₂ O; 31,9 SiO ₂ ; 60,6 F-	3,03; 3,14; 1,65
Кадмій сірністий	CdS	144,48	4,6	100,0 CdS	1,00
Калій азотнокислий	KNO ₃	101,10	2,1	46,6 K ₂ O	2,15
Калій вуглекислий	K ₂ CO ₃	138,20	2,3	68,0 K ₂ O	1,47
Калій двохромовокислий	K ₂ Cr ₂ O ₇	294,21	2,7	32,0 K ₂ O	3,13
Кальцій вуглекислий	CaCO ₃	100,09	2,6-2,8	51,7 Cr ₂ O ₃	1,93
Кальцій фтористий	CaF ₂	78,08	3,2	56,0 CaO; 71,8 CaO; 48,7 F	1,78; 1,39; 2,05

Продовження таблиці А1

Найменування матеріалу	Хімічна формула	Молекулярна маса	Щільність, $d \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	Вміст компонентів, які вводяться в емаль на 100 мас. ч. матеріалу	Шихтний множник
Кобальту оксид (III)	Co ₂ O ₃	165,88	5,2	100,0 Co ₂ O ₃	1,00
Кобальту оксид (II)	CoO	74,91	6,5	100,0 CoO	1,00
Кобальту оксид	Co ₃ O ₄	240,82	6,1	93,3 CoO	1,07
Купрум(II) оксид (II)	CuO	79,54	6,4	100,0 CuO	1,00
Купрум(II) оксид (I)	Cu ₂ O	143,08	6,0	100,0 Cu ₂ O	1,00
Літій вуглекислий	Li ₂ CO ₃	73,89	2,1	40,6 Li ₂ O	2,47
Магній вуглекислий	MgCO ₃	84,33	2,9 – 3,1	47,8 MgO	2,10
Магнію оксид	MgO	40,32	3,2 – 3,7	100,0 MgO	1,00
Мангану оксид (IV)	MnO ₂	86,93	4,7 – 5,0	90,8 Mn ₂ O ₃	1,10
Молібдену оксид (VI)	MoO ₆	143,95	4,5	100,0 MoO ₆	1,00
Натрій азотнокислий	NaNO ₃	85,01	2,3	36,5 Na ₂ O	2,74
Натрій азотнокислий	NaNO ₂	69,01	2,2	44,9 Na ₂ O	3,23
Натрій вуглекислий	NaCO ₃	106,00	2,5	58,5 Na ₂ O	1,71
Натрій кремнефтористий	Na ₂ SiF ₆	188,10	2,7	33,0 Na ₂ O; 31,9 SiO ₂ ; 60,6 F	3,03; 3,14; 1,65
Натрій метафосфорнокислий	NaPO ₃	101,98	–	30,4 Na ₂ O; 69,6 P ₂ O ₅	3,29; 1,44
Натрій фосфорнокислий одноміщений гідрат	NaH ₂ PO ₄ · 2H ₂ O	156,03	1,9	19,9 Na ₂ O; 45,5 P ₂ O ₅	5,03; 2,20
Натрій фосфорнокислий двоміщений гідрат	Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O	358,17	1,5	17,3 Na ₂ O; 19,5 P ₂ O ₅	5,77; 5,05
Натрій фосфорнокислий тризміщений гідрат	Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O	380,16	1,6	24,1 Na ₂ O; 18,7 P ₂ O ₅	4,15; 5,33
Нікелю оксид (II)	NiO	74,69	7,4	100,0 NiO	1,00
Нікелю оксид (III)	Ni ₂ O ₃	165,38	4,8	90,6 NiO	1,10
Нікель вуглекислий	NiCO ₃	118,70	–	62,9 NiO	1,60
Плюмбуму оксид (II–III) сурик	Pb ₃ O ₄	685,63	9,0–9,2	97,7 PbO	1,02
Стануму оксид (IV)	SnO ₂	150,70	6,7–7,2	100,0 SnO ₂	1,00
Селен металічний	Se	78,96	4,5–4,8	100,0 Se	1,00
Стронцій вуглекислий	SrCO ₃	147,64	3,6–3,8	70,1 SrO	1,42
Сурма металічна	Sb	121,76	6,7	119,7 Sb ₂ O ₃	0,83
Сурми оксид (III)	Sb ₂ O ₃	291,52	5,7	100,0 Sb ₂ O ₃	1,00
Титану оксид (IV)	TiO ₂	79,90	4,3	100 TiO ₂	1,00

Закінчення таблиці А1

Найменування матеріалу	Хімічна формула	Молекулярна маса	Щільність, $d \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	Вміст компонентів, які вводяться в емаль на 100 мас. ч. матеріалу	Шихтний множник
Феруму оксид	Fe ₂ O ₃	159,70	5,2	100,0 Fe ₂ O ₃	1,0
Феруму закис – оксид	Fe ₃ O ₄	231,55	5,2	93,0 FeO	1,7
Хрому оксид (III)	Cr ₂ O ₃	152,02	5,2	100,0 Cr ₂ O ₃	1,00
Цинку оксид (II)	ZnO	81,38	5,6	100,0 ZnO	1,00
Цирконію оксид (IV)	ZrO ₂	123,22	5,6–6,2	100,0 ZrO ₂	1,00
Церію оксид (IV)	CeO ₂	172,13	7,2–7,5	100,0 CeO ₂	1,00

Виробничо-практичне видання

Методичні рекомендації
до виконання практичної та самостійної роботи
із навчальної дисципліни

«ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА СКЛО МАТЕРІАЛІВ»

*(для студентів для студентів I курсу денної форми навчання
другого (магістерського) рівня вищої освіти
за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія)*

Укладачі: **ВОРОНОВ** Геннадій Костянтинович,
САВВОВА Оксана Вікторівна,
СМИРНОВА Юлія Олегівна,
... **ФЕСЕНКО** Олексій Ігорович

Відповідальний за випуск *І. С. Зайцева*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *Г. К. Воронов*

План 2020, поз. 111М

Підп. до друку 18.07.2020. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 1,3.

Тираж 50 пр. Зам. № .

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.